



HAL
open science

Impact de l'incendie de forêt d'août 1990 sur le comportement hydrologique du bassin versant du Rimbaud (massif des Maures, Var, France)

Jacques Lavabre, Claude Martin, Nathalie Folton

► To cite this version:

Jacques Lavabre, Claude Martin, Nathalie Folton. Impact de l'incendie de forêt d'août 1990 sur le comportement hydrologique du bassin versant du Rimbaud (massif des Maures, Var, France). Valérie Prosper-Laget. Eaux sauvages, eaux domestiquées, Publications de l'Université de Provence, pp.139-154, 2001. hal-00332449v1

HAL Id: hal-00332449

<https://hal.science/hal-00332449v1>

Submitted on 21 Oct 2008 (v1), last revised 29 Oct 2008 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Impact de l'incendie de forêt d'août 1990 sur le comportement hydrologique du bassin versant du Rimbaud (massif des Maures, Var, France)

Jacques LAVABRE *, Claude MARTIN ** et Nathalie FOLTON *

* *Cemagref* - Groupement d'Aix-en-Provence, le Tholonet, BP 31, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1.

** UMR 5651 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie, Université de Nice - Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3209, 06204 Nice Cedex 3.

1. Présentation du terrain d'étude

Le bassin du Rimbaud (1,46 km²), situé dans la partie occidentale du massif des Maures (fig. 1), appartient au Bassin Versant de Recherche et Expérimental (BVRE) du Réal Collobrier, suivi par le *Cemagref* depuis 1966. Son substratum est constitué de gneiss massifs affectés d'un très fort pendage vers le NW. Les altitudes sont comprises entre 470 et 622 m. La pente moyenne des versants avoisine 9° ; mais leur inclinaison dépasse souvent 20° à proximité des thalwegs. Les sols – peu épais, caillouteux, à texture sableuse, et à structure grumeleuse à submotteuse – appartiennent à la classe des rankers. Ils recouvrent généralement des roches altérées cohérentes, mais on trouve aussi, très localement, des arènes sableuses conservées sous forme de poches. L'épaisseur moyenne des formations superficielles est de 30 cm environ.

En août 1990, un incendie a dévasté 8400 h dans la partie occidentale du massif des Maures. Le feu a parcouru 84 % du bassin versant du Rimbaud (Puech *et al.*, 1991 ; P. Viné et C. Puech, 1994), détruisant un maquis à bruyères arborescentes et arbousiers complanté de chênes lièges et de pins maritimes. Seule l'extrémité orientale et une châtaigneraie située dans la partie aval ont été épargnées.

En 1990-91, l'Office National des Forêts a procédé, dans la partie inférieure du bassin, au traitement d'une dizaine d'hectares de terrain incendié. Un bulldozer a raboté les versants pour ne plus laisser que le sol à nu. Les arbres morts, des blocs rocheux, mais aussi de la terre ont été déversés dans le lit des ruisseaux. Ces travaux ont été suivis d'un sous-solage qui a préparé une replantation en résineux. Par ailleurs, au cours de l'hiver 1991-1992, les arbres morts et la végétation en cours de régénération ont été détruits (sauf les chênes lièges) sur près de 70 ha, à l'aide de tracteurs gyrobroyeurs ou à la tronçonneuse.

Depuis 1967, le bassin versant est équipé d'un pluviographe à augets basculeurs (situé au centre du bassin) et d'un limnigraphe (Fig. 1). Le déversoir triangulaire de la station hydrométrique garantit la bonne précision des mesures, même pour les forts débits. Les enregistrements de la pluie et des hauteurs d'eau du ruisseau sont disponibles sur papier de 1967 à 1988. La mise en place d'appareils électroniques en 1988 a permis d'améliorer le suivi temporel : mesure des hauteurs de pluie chaque minute et bon synchronisme avec l'enregistreur des hauteurs d'eau. La pluie sur le bassin est déterminée en prenant en compte

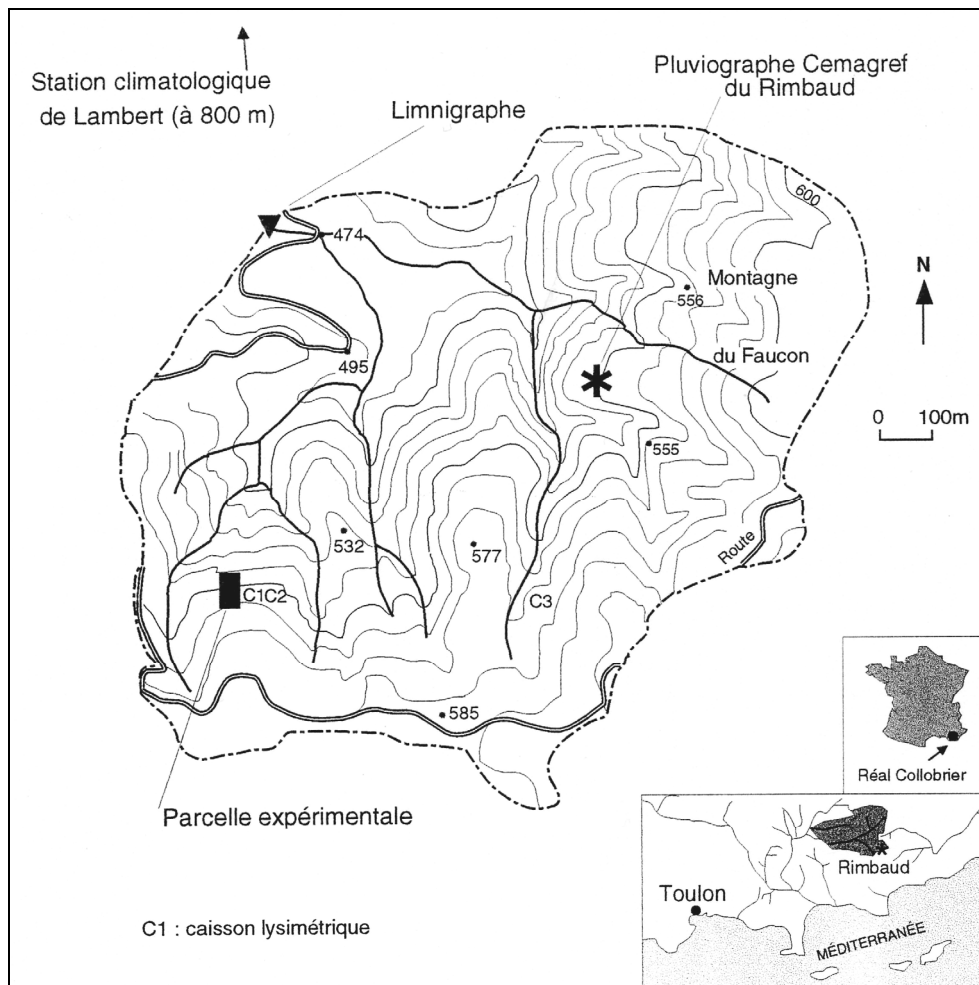


Figure 1 - Localisation et équipement du bassin versant du Rimbaud.

d'autres pluviographes du réseau d'observation du BVRE du Réal Collobrier, en utilisant la fonction SPLINE 2D (J. Lavabre, 1988). Cependant, si trois pluviographes sont implantés sur le bassin versant du Valescure, un seul poste se trouve sur celui du Rimbaud et il pèse d'un poids déterminant dans le calcul des pluies de ce bassin.

Immédiatement après l'incendie, le dispositif a été complété par une parcelle expérimentale de ruissellement d'une superficie de $75,2 \text{ m}^2$ pour une longueur de 12 m, reliée par une gouttière à une batterie de deux cuves réceptrices dont la première sert de partiteur au 1/9. L'équipement de cette parcelle située en terrain incendiée, comporte un pluviographe à enregistrement sur papier. Une parcelle du même type, mais défrichée manuellement avait été exploitée, au même endroit, dans les années 1976-1980.

2. Hydroclimatologie générale

2.1 Les données annuelles

Avec des précipitations annuelles moyennes supérieures à 1100 mm et une température moyenne de 12 °C environ, le bassin versant connaît un climat de type méditerranéen humide. Il peut toutefois présenter des années relativement sèches (Tab. I). Si

la période août 1967 - juillet 1980 a été très humide, la période août 1980 - juillet 1990 a été marquée par une sévère déficience des pluies (C. Martin et V. Marc, 1993). Les deux années avant l'incendie ont été particulièrement sèches, les précipitations annuelles atteignant respectivement 536 et 625 mm sur le bassin versant du Rimbaud. Les précipitations sont redevenues plus abondantes après l'incendie (985 mm en 1990-91, 754 mm en 1991-92, 1051 mm en 1993-94, 967 mm en 1994-95, 1472 mm en 1995-96, 1391 mm en 1996-97).

Les écoulements annuels sont relativement abondants (660 mm en moyenne – Tab. 11), bien que le ruisseau présente quasi systématiquement des étiages nuls pendant une partie de l'été. Le déficit d'écoulement annuel, calculé comme la différence entre la pluviométrie et l'écoulement annuels, n'est pas très élevé. Il est de plus relativement stable, comme en témoigne son coefficient de variation (écart-type / moyenne) qui est de 15 %. Ce comportement indique une faible capacité de stockage du bassin, ce qui est cohérent avec la minceur des formations superficielles et la massiveté des roches.

Tableau I - Pluviométrie, écoulement et déficit d'écoulement annuels sur le bassin versant du Rimbaud d'août 1967 à juillet 1990 (année hydrologique : août à juillet).

	P_A	L_A	D_A
Moyenne (mm)	1154	660	494
Écart-type (mm)	357	337	75
Valeurs extrêmes (mm)	536 - 1845	105 - 1234	390 - 690

PA : pluie annuelle. LA : écoulement annuel. DA : déficit d'écoulement annuel ($= PA - LA$).

2.2 Les données mensuelles

La distribution des précipitations est tout à fait classique sous climat méditerranéen : sécheresse marquée des mois d'été et, au contraire, hiver et printemps généralement pluvieux. En ce qui concerne les écoulements, on remarque principalement :

- des déficits relativement élevés en début d'année hydrologique, en relation avec la recharge souterraine ;
- une bonne correspondance avec la pluviométrie à partir du mois de janvier.

2.3 Les crues

La massiveté des roches, la minceur des formations superficielles et les caractères morphométriques du bassin versant (Kc de Gravelius = 1,07 ; $Dd = 4,86 \text{ km/km}^2$; Rc de Strahler = 2,81) s'associent pour que le ruisseau du Rimbaud réagisse violemment aux précipitations.

Sur la période 1967-1990, le débit de pointe de crue décennal, estimé à partir d'une distribution de fréquence empirique, en utilisant la formule de A. Hazen (1930), s'établit à $7 \text{ m}^3/\text{s}$ environ, soit $4,7 \text{ m}^3/\text{s/km}^2$. La valeur maximale a été observée le 13 septembre 1968, en réponse à des précipitations de 20 mm en une heure, puis de 110 mm en une heure et quart. Cet épisode a manifesté un caractère très violent, le débit passant de 15 l/s à plus de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ en une heure et demi.

3. L'impact de l'incendie sur les écoulements annuels

3.1 Principe général de la démarche

Les conséquences du feu sur le comportement hydrologique du bassin versant du Rimbaud sont appréhendées en comparant les écoulements observés sur le bassin versant après incendie avec les valeurs des écoulements calculées pour la même période à partir de relations établies avant incendie. Le calcul des écoulements est basé soit sur l'information pluviométrique disponible sur le bassin, soit sur les écoulements d'un bassin versant témoin. Le bassin versant du BVRE du Réal Collobrier présentant les meilleures garanties pour servir de témoin est celui du Valescure. Toutefois ce bassin présente un substratum associant aux gneiss, des roches plus fissiles et/ou plus altérables : des micaschistes et des amphibolites. De plus, en relation avec la dissection du relief, la décompression des roches est ici assez forte. La combinaison de ces éléments explique que l'écoulement annuel moyen n'atteigne pas 40 % de la pluviométrie, alors qu'il approche 60 % sur le bassin du Rimbaud. Sur la période août 1968 - juillet 1990, le bassin versant du Valescure a reçu des précipitations annuelles moyennes de 1207 mm (écart-type : 368 mm) et l'écoulement annuel moyen a atteint 456 mm (écart-type : 271 mm).

Les résultats ainsi obtenus font l'objet d'une analyse critique, à travers la confrontation – menée selon la même approche – des écoulements du bassin versant témoin avant et après l'incendie.

3.2 Les régressions entre les données annuelles

Cette approche ne fournit qu'une image extrêmement lissée de la réalité hydrologique, laquelle résulte de l'intervention de nombreux processus (interception des pluies par la végétation, évaporation et évapotranspiration, formation des écoulements de crue, *etc.*) dont la combinaison génère des phénomènes non reproductibles. Les enseignements possibles sont donc limités et se réduisent en fait à un bilan numérique. Au demeurant, ce type d'approche exige beaucoup de prudence. À titre d'exemple, le tableau II présente les écarts entre les écoulements observés et ceux calculés en utilisant deux équations de régression établies à partir de la même information. Il est clair que l'interprétation d'une différence de quelques dizaines de mm serait, pour le moins, hasardeuse.

Tableau II - Bassin versant du Valescure : écarts (mm) entre les écoulements observés et ceux calculés en utilisant deux équations de régression établies à partir de la même information avant incendie (août 1968 - juillet 1990).

Années	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96	1996-97
Régression 1 *	-111	-143	-97	1	22	-8	71
Régression 2 **	-50	-110	-38	60	84	-102	111

* : régression 1 : $La = 0,7104 Pa - 4011,2$; $r^2 = 0,929$. ** : régression 2 : $La = 0,0344 (Pa/100)^{2,44}$; $r^2 = 0,922$. La : écoulement annuel. Pa : pluviométrie annuelle.

Les équations de régression sont établies sur la période commune de suivi des bassins versants avant incendie : août 1968 - juillet 1990 (Tab. III). Les coefficients de détermination élevés témoignent de la qualité des liaisons.

Tableau III - Différentes liaisons de la forme $y = ax + b$.

Liaisons	y	x	a	b	r^2
R1	La(r)	Pa(r)	0,895	- 363	0,97
R2	La(r)	Pa(v)	0,887	- 398	0,93
R3	La(r)	La(v)	1,14	+ 161	0,91
R4	La(v)	Pa(v)	0,710	- 401	0,93
R5	Pa(r)	Pa(v)	0,967	0	0,96

y : variable expliquée. x : variable explicative. a et b : termes de la relation $y = ax + b$. r^2 : coefficient de détermination. La : écoulement annuel (mm). Pa : pluviométrie annuelle (mm). (r) : bassin versant du Rimbaud. (v) : bassin versant du Valescure.

3.3 La modélisation des écoulements

Les modèles utilisés appartiennent à la famille GR développée au *Cemagref* (Michel C. *et al.*, 1991). Il s'agit des modèles GR2, pour le calcul des débits mensuels (GR2M), et GR3, pour le calcul des débits journaliers (GR3J) et des débits au pas de temps de quelques minutes (GR3H). Ce sont des modèles conceptuels empiriques qui prennent en compte deux réservoirs :

- un réservoir S soumis à l'évapotranspiration ;
- un réservoir R d'eau gravitaire.

Pour GR2, deux paramètres (α et β) règlent les entrées et sorties des réservoirs. Dans le cas de GR3, deux paramètres représentent la taille maximale des réservoirs (A pour S, et B pour R), alors qu'un troisième (C) assure une répartition de la pluie dans le temps et commande les hydrogrammes unitaires de l'alimentation du réservoir R (90 % de l'eau non stockée dans S) et d'un "écoulement rapide" (10 % de l'eau non stockée dans S). La vidange progressive du réservoir R est fonction du taux de remplissage du réservoir par rapport à son volume maximal.

Pour les bassins faisant l'objet d'un suivi hydrologique, les valeurs des paramètres sont fournies par les modèles eux-mêmes, par optimisations successives en vue de minimiser l'écart entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées.

3.4 Les résultats obtenus

Les équations de régression permettent de calculer les variables expliquées sur la période de calage (août 1968 - juillet 1990) et sur la période après incendie (août 1990 - juillet 1997). Les écarts entre valeurs calculées et mesurées sont portés sur les figures 2 à 6. Les figures 7 et 8 sont établies à partir des estimations par modélisation (Lavabre J. *et al.*, 1997).

La liaison R1 (Fig. 2) et les modèles GR (Fig. 7 et 8) montrent un supplément d'écoulement du bassin versant du Rimbaud en 1990-91, 1991-92, 1992-93 et 1994-95. Les écarts les plus forts sont obtenus avec la modélisation mensuelle par GR2M (Fig. 7). Le faible écart manifesté en 1991-92 sur la figure 2 ne suffit pas pour laisser envisager une atténuation de l'impact de l'incendie en liaison avec la reconquête végétale. En se fondant sur ces trois analyses, on pourrait estimer à 100 mm l'ordre de grandeur du supplément d'écoulement durant les trois années après incendie (soit 10 à 15 % de la pluviométrie annuelle).

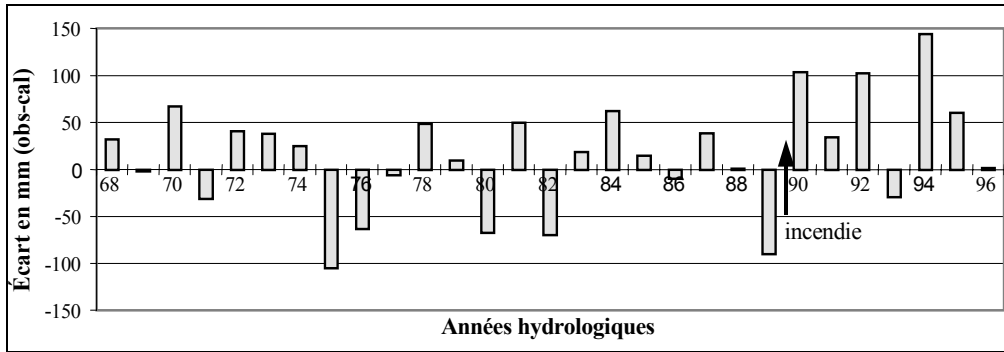


Figure 2 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud observés et calculés par la relation R1 (pluies annuelles du bassin versant du Rimbaud).

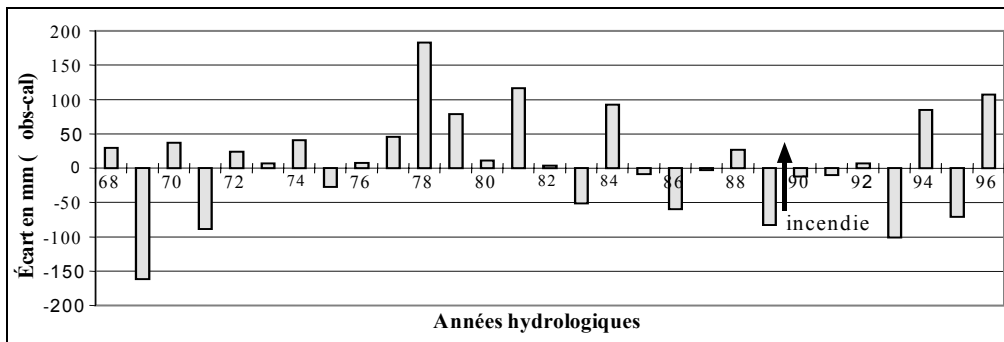


Figure 3 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud observés et calculés par la relation R2 (pluies annuelles du bassin versant du Valescure).

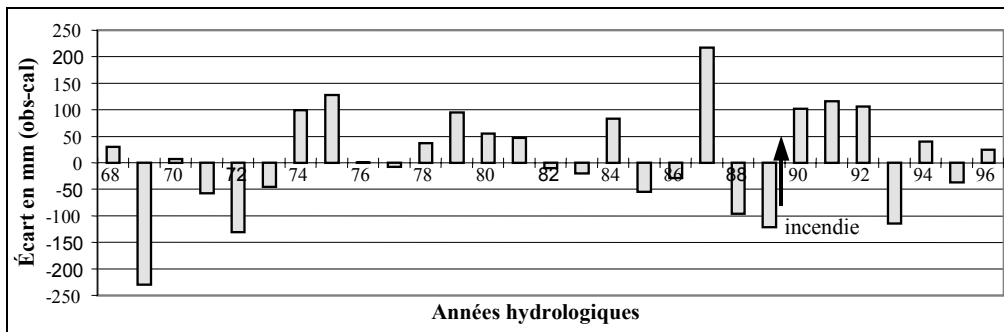


Figure 4 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud observés et calculés par la relation R3 (écoulements annuels du bassin versant du Valescure).

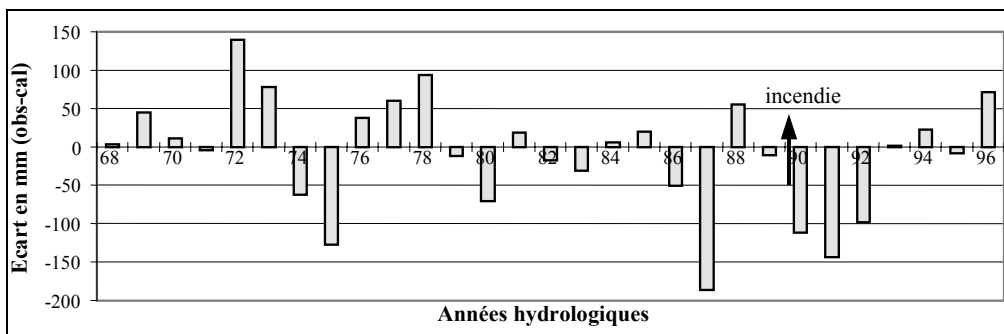


Figure 5 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Valescure observés et calculés par la relation R4 (pluies annuelles du bassin versant du Valescure).

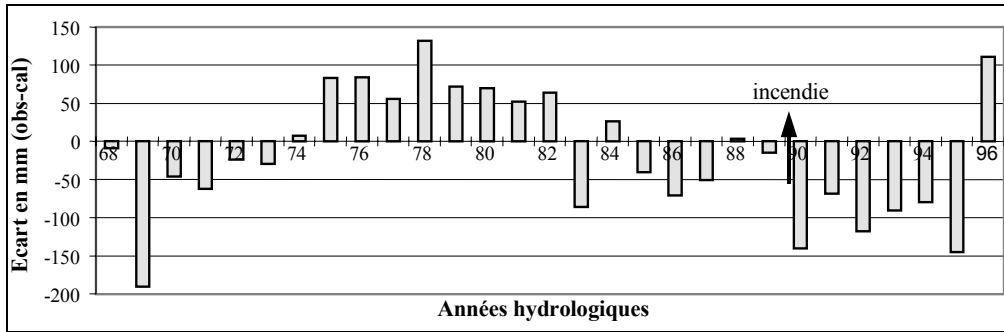


Figure 6 - Écarts entre les pluies annuelles du bassin versant du Rimbaud observées et calculées par la relation R5 (pluies annuelles du bassin versant du Valescure).

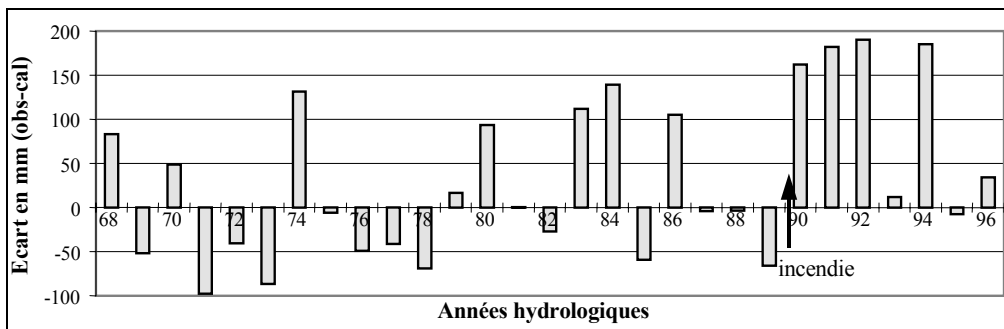


Figure 7 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud observés et calculés par le modèle GR2M (pluies du bassin versant du Rimbaud).

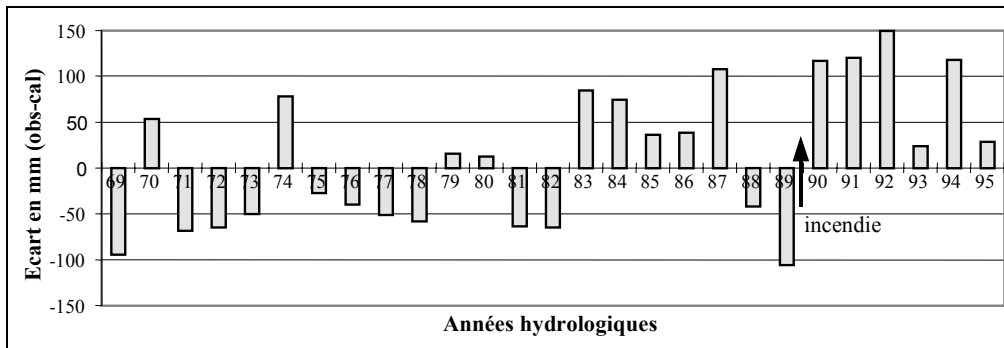


Figure 8 - Écarts entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud observés et calculés par le modèle journalier GR3J (pluies du bassin versant du Rimbaud).

Les liaisons R1 (Fig. 2) et R4 (Fig. 5), qui expriment les écoulements annuels en fonction des pluies annuelles, portent respectivement sur les bassins versants du Rimbaud et du Valescure. Pour ce dernier, l'analyse fait ressortir des déficits d'écoulement de l'ordre de 100 mm en 1990-91, 1991-92 et 1992-93. Ces écarts sont opposés à ceux du Rimbaud. Mais ils posent un problème d'ordre méthodologique ou de stationnarité des séries. En effet, comment interpréter une succession de trois années déficitaires, alors que le bassin versant n'a subi aucune modification connue ? On est conduit à se demander si, pendant cette période, le bassin du Valescure n'a pas accusé la sécheresse des années précédentes.

Les liaisons R2 (Fig. 3) et R3 (Fig. 4) abordent la comparaison entre les bassins du Rimbaud et du Valescure. La liaison R3 (écoulements annuels du Rimbaud expliqués par les

écoulements annuels du Valescure) met, elle aussi, en évidence un supplément d'écoulement du bassin versant en 1990-91, 1991-92 et 1992-93. Le plus fort écart est obtenu en 1991-92, ce qui est en désaccord avec les résultats fournis par la liaison R1. Au contraire, en 1993-94, la liaison R3 attribue au bassin versant du Rimbaud un déficit d'écoulement important. Pour sa part, la liaison R2 (écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud expliqués par les pluies annuelles sur le bassin versant du Valescure) ne fait apparaître aucun impact de l'incendie.

3.5 Discussion

En utilisant une série de régressions, en apparence toutes satisfaisantes, du moins à la lumière des coefficients de détermination, nous sommes confrontés à des résultats divergents.

La relation entre les écoulements et les pluies annuels du bassin versant du Rimbaud (liaison R1) fait apparaître des suppléments d'écoulement après incendie. Ce résultat est conforme à la conception que nous pouvons avoir *a priori* de l'impact du feu. Mais les calculs s'appuient sur les données d'un seul pluviographe, qui plus est situé dans un milieu soumis à une très forte perturbation.

En négligeant l'information pluviométrique recueillie sur le bassin versant du Rimbaud, l'analyse des écoulements conduite en s'appuyant sur la pluviométrie du bassin versant témoin du Valescure (liaison R2), conclut à un impact nul de l'incendie. Les pluies du bassin versant témoin sont établies à partir des données de plusieurs pluviographes, lesquels se trouvent en outre situés dans un milieu qui n'a pas été perturbé. Il y a donc toute raison de croire en la fiabilité de la série pluviométrique.

La relation R3 entre les écoulements des bassins versants du Rimbaud et du Valescure fait apparaître un supplément d'écoulement sur le bassin versant incendié durant les trois premières années après le feu. Toutefois les écoulements du bassin témoin semblent être affectés d'une non-stationnarité (liaison R4) à laquelle pourraient être imputés les suppléments d'écoulement attribués au bassin versant incendié ! Le bassin témoin accuse certainement le fort déficit hydrique consécutif aux années 1988-89 et 1989-90, au cours desquelles les précipitations ont été particulièrement faibles. Cela ne signifie pas, pour autant, qu'en absence d'incendie, le bassin versant du Rimbaud aurait eu un comportement analogue à celui du Valescure.

La figure 6 (liaison R5) donne à penser que la chronique pluviométrique du bassin versant du Rimbaud est affectée d'une non-stationnarité. La pluviométrie annuelle de ce bassin apparaît souvent très déficitaire par rapport à la valeur calculée à partir de la pluviométrie du bassin du Valescure, mais cela est tout particulièrement net sur la période août 1990 - juillet 1996 (écart moyen de 100 mm). Des écarts inverses se sont produits sur la période août 1975 - juillet 1983.

Les pluviographes des parcelles expérimentales de ruissellement qui ont été exploitées sur le bassin versant du Rimbaud (C. Martin, 1989 ; C. Martin *et al.*, 1996), à quelques centaines de mètres du poste suivi par le *Cemagref*, fournissent des informations complémentaires (Tab. IV). Il ressort, d'une part, que les précipitations ne sont pas homogènes sur l'ensemble du bassin et que les écarts sont plus ou moins marqués selon les années, et, d'autre part, que la différence entre les pluviométries du bassin versant et du site des parcelles mise en évidence avant l'incendie, s'est largement maintenue après celui-ci.

Tableau IV - Écarts entre la pluviométrie du bassin versant du Rimbaud et celle à l'emplacement des parcelles expérimentales de ruissellement.

Années (août à juillet)	Écarts (mm) *	Écarts (%) **
1976-77	≈ +209 ☐	+11,3
1977-78	+102	+6,6
1978-79	+82	+8,8
1979-80	+212	+15,0
Moyenne 1976-1980	+151	+11,5
1990-91	≈ +130 ☐	+13,2
1991-92	+10	+1,3
1992-93	+96	+9,4
1993-94	+38	+3,7
Moyenne 1990-1994	+68,5	+7,2

* : les écarts en mm sont déterminés par différence entre la pluviométrie du bassin du Rimbaud et celle des parcelles expérimentales. ** : les écarts en % sont exprimés par rapport à la pluviométrie du bassin versant du Rimbaud. ☐ : les précipitations de juillet 1976 et de juillet 1990 ont été estimées.

Le pluviographe du Rimbaud ayant été remplacé à l'identique après sa destruction par l'incendie, quatre hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer la non-homogénéité de la chronique pluviométrique :

- 1 / Les incertitudes sur les données des pluviographes : Depuis la mise en place des nouveaux pluviographes en 1988, les eaux interceptées sont recueillies dans des bidons enterrés dont la contenance correspond à des précipitations de 230 mm environ. La mesure systématique des volumes recueillis n'a pas fait apparaître de dérive notable. En revanche, avant le remplacement des appareils précédents, les eaux interceptées étaient stockées dans des seaux d'une contenance correspondant à des pluies de 80 mm seulement et sujets à une forte évaporation. La qualité des mesures réalisées dans ces conditions était donc beaucoup moins certaine. Dans le cas où le poste du Rimbaud aurait surestimé la pluviométrie du bassin versant durant la période avant incendie, et notamment de 1975 à 1983, la relation établie sur cette période aboutirait à des résultats par défaut après août 1990, et serait donc majorante pour l'évaluation de son impact. Notons cependant que les deux périodes d'observation communes (1976-1980 et 1990-1994) fournissent des écarts relatifs entre les pluviométries moyennes du bassin versant du Rimbaud et des parcelles peu différents (11,5 et 7,2 %). Ces périodes correspondent pourtant à des situations très opposées : excédent de pluviométrie du bassin versant du Rimbaud par rapport à la valeur calculée à partir de la relation avec les précipitations sur le bassin du Valescure, pour la première ; déficit marqué, pour la seconde.
- 2 / L'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies sur le bassin versant du Rimbaud : Les enseignements du tableau IV concernant les fluctuations interannuelles des écarts de pluviométrie entre le bassin versant du Rimbaud et le site des parcelles expérimentales interdit de négliger cette hypothèse. Toutefois les données moyennes ne la confortent pas. En effet, si l'écart relatif entre les pluviométries du bassin versant et du site des parcelles se réduit entre 1976-1980 et 1990-1994, la diminution représente moins de 5 % des précipitations. Elle est donc trop faible pour apporter une explication suffisante à la non-stationnarité de la chronique pluviométrique du bassin.

- 3 / L'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies entre les bassins versants du Rimbaud et du Valescure : En 1996-97, la pluviométrie du bassin versant du Rimbaud manifeste un excédent par rapport à la valeur calculée à partir de la relation avec les précipitations sur le bassin du Valescure (Fig. 6). Ce résultat constitue un argument en faveur de cette hypothèse. Cependant, dans son cas, aussi bien que dans celui de l'hypothèse 2, il semble douteux que l'hétérogénéité spatio-temporelle des pluies produise les mêmes effets au cours de plusieurs années consécutives.
- 4 / La modification de l'environnement immédiat du pluviographe du Rimbaud : En détruisant la végétation, l'incendie a peut-être affecté le pouvoir de captation du pluviographe en provoquant une accélération du vent au sol. Selon cette hypothèse, la pluie réelle serait plus abondante que la pluie mesurée, ce qui réduirait proportionnellement les suppléments d'écoulement calculés. Cette hypothèse est en accord avec les données du tableau IV.

Conclure au sujet de l'influence de l'incendie sur les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud s'avère bien délicat. Les résultats sont dans la marge d'incertitude des relations utilisées, et la non-stationnarité apparente de la chronique pluviométrique du bassin du Rimbaud ne facilite pas les interprétations. Le travail s'oriente donc vers une exploitation plus fine, au pas de temps journalier, des données de la modélisation par GR3J. L'information sera en outre complétée par le calcul des écoulements des bassins versants du Rimbaud et du Valescure à partir de la pluviométrie du bassin du Valescure.

4. Le comportement du bassin versant en crue

La question de la stationnarité de la chronique pluviométrique du Rimbaud se pose aussi pour l'étude des crues. Mais elle présente, dans ce cas, beaucoup moins d'acuité (voir Fig. 20).

4.1 Approche descriptive sur les seuls débits

En 1990-91, le comportement du ruisseau du Rimbaud est devenu fortement impulsif. Le débit maximal a atteint $7,8 \text{ m}^3/\text{s}$ le 9 décembre, pour des précipitations ne présentant aucun caractère exceptionnel, ni par leur abondance (88,0 mm) ni par leur intensité (intensité maximale en 6 minutes de l'ordre de 40 mm/h). Un autre très fort débit a été observé le 23 novembre ($5,5 \text{ m}^3/\text{s}$). Les montées de crue ont souvent demandé moins de cinq minutes, et les décrues ont été elles-mêmes très rapides. Le caractère excessif pris par les réactions du cours d'eau aux précipitations s'explique par le ruissellement sur les versants mis à nu par l'incendie. L'année 1991-92 n'a connu qu'un seul épisode violent ($3,6 \text{ m}^3/\text{s}$, en octobre), mais plusieurs crues spectaculaires se sont encore produites en 1992-93 ($7,7 \text{ m}^3/\text{s}$ en septembre ; $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en octobre ; $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en novembre). En 1993-94, le débit maximal a atteint $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ seulement. La reprise végétale est alors intervenue pour amortir la réponse des écoulements aux précipitations (taux de recouvrement des surfaces incendiées par les arbustes : 15 % en août 1991, 30-35 % en août 1992 et 45-50 % en août 1993 – en s'appuyant pour partie sur les observations de C. Puech *et al.*, 1994, et de P. Viné, 1997).

Les débits de pointe de crue les plus élevés de la période post-incendie ont été générés par des pluies d'un volume très modéré pour le terrain d'étude. Sur la figure 9, qui met en relation les débits instantanés maximaux relevés en automne et les précipitations en 24 h correspondantes, plusieurs crues après incendie s'individualisent nettement. Il apparaît, en particulier, que les débits de crue de fréquence décennale sont liés à des pluies en 24 h tout à

fait courantes, de l'ordre de 80 mm alors que la pluie décennale en 24 h est estimée à 160 mm. De nombreux débits de crue après incendie se positionnent toutefois dans le nuage des points représentant les crues avant incendie.

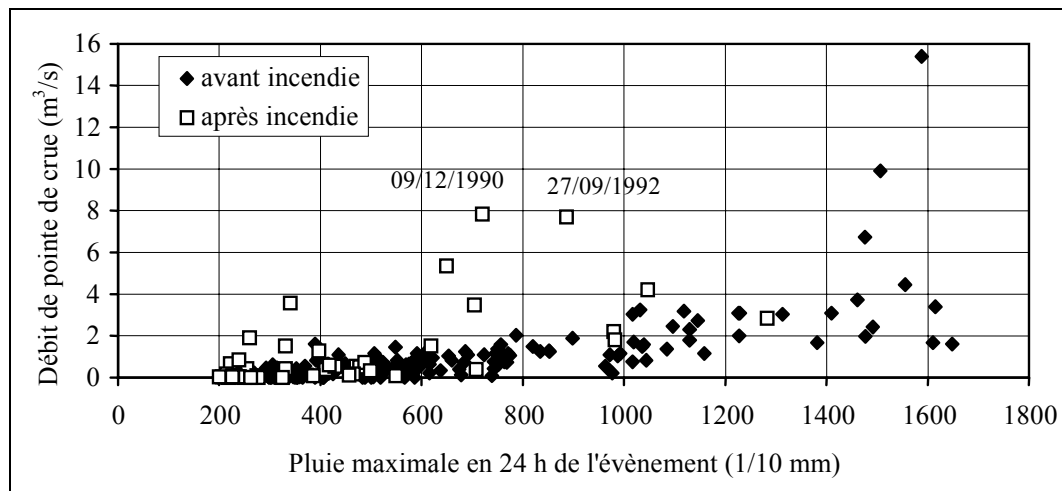


Figure 9 - Relations en automne (septembre, octobre et novembre) entre les débits de pointe de crue et les précipitations en 24 heures (période après incendie : septembre 1990 - novembre 1994).

La décomposition des hydrogrammes de crue du 9 décembre 1990 et du 27 septembre 1992 (C. Martin et J. Lavabre, 1997), en utilisant comme traceurs les ions chlorures et le sodium, a mis en évidence l'abondance du ruissellement superficiel sur les versants lors des épisodes les plus violents. Les deux épisodes diffèrent nettement par l'abondance des écoulements générés par les précipitations (coefficient d'écoulement total : 18,6 % en septembre 1992, pour des précipitations de 72 mm tombant en début d'année hydrologique ; 87,5 % en décembre 1990). Mais elles se ressemblent par les débits maximaux (7,7 et 7,8 m³/s) et par l'abondance des eaux fournies par le ruissellement sur les versants pendant la crue elle-même. Cette source d'alimentation représente 89 % du débit de pointe et 76 % du volume d'eau écoulé pendant la crue du 27 septembre 1992 ; 89 % du débit de pointe et 47 % du volume d'eau écoulé pendant la crue du 9 décembre 1990. La crue du 27 septembre 1992 s'est produite alors que le bassin versant était déjà partiellement revégétalisé. Sa violence est liée à l'intensité des pluies (120 mm/h pendant 10 minutes – alors qu'elle a atteint seulement 40 mm/h en 6 minutes en décembre 1990). Des pointes de crue bien plus spectaculaires ont été observées avant l'incendie, en particulier le 13 septembre 1968. En effet, dans certaines parties du bassin, le couvert végétal et les formations superficielles se sont toujours révélées insuffisants pour amortir la réponse hydrologique lorsque les précipitations sont à la fois très intenses et abondantes. Les secteurs situés à proximité de la partie moyenne des ruisseaux, sur des versants très raides où les gneiss affleurent largement, jouent à cet égard un rôle essentiel. En septembre 1992, leur revégétalisation était trop modeste pour empêcher que se produise un ruissellement aussi fort que celui observé sur la parcelle expérimentale (coefficient d'écoulement mesuré le 27 septembre : 95 %).

4.2 Approche par modélisation pluie-débit

Le traitement est réalisé au pas de temps de 15 minutes. L'examen porte uniquement sur la saison automne (mois de septembre, octobre et novembre), afin de le limiter à une

typologie bien particulière de crue : crues générées sur un bassin en cours de ré-humectation et consécutives à des pluies de forte intensité.

Pour la sélection des événements, qui peut engendrer des biais sur les analyses postérieures, le critère suivant est adopté : une pluie journalière supérieure à 20 mm constitue un événement. Les événements n'ayant provoqué aucune réponse du ruisseau ne sont pas examinés par la suite. Le pourcentage d'événements rejetés s'avère être sensiblement le même avant et après incendie. Les échantillons ainsi établis comportent 44 événements avant incendie et 15 après.

De manière très générale, le tableau 15 indique que les coefficients d'écoulement de crue après incendie ont augmenté de façon sensible ; ils sont en moyenne multipliés par deux. Une augmentation plus forte est notable sur le ratio débit maximum de la crue / pluie maximale en 6 h de l'événement, qui est en moyenne multiplié par quatre.

Tableau V - Valeurs médianes du coefficient d'écoulement du bassin versant avant et après incendie.

Périodes	Q6h / P6h	Qmax / P6h
1968-69 - 1989-90	9,8 %	0,94 %
1990-91 - 1994-95	17,5 %	3,6 %

Q6h et P6h représentent respectivement l'écoulement maximum et la pluie maximale de l'événement calculés sur une durée de 6 heures. Ils sont exprimés en mm. Qmax (m³/s) est le débit maximum de l'événement.

Le calage des paramètres du modèle GR3H est effectué crue par crue. On constate une baisse des valeurs médianes des paramètres B et C sur la période post-incendie (Tab. VI). Malgré la dispersion des valeurs numériques des paramètres, d'ailleurs plus faible après incendie, ces diminutions sont significatives. Au sens de la modélisation, elles traduisent une accélération des écoulements.

Tableau VI - Valeurs médianes des paramètres du modèle GR3H, au pas de 15 minutes.

Périodes	A (mm)	B (mm)	C (heure)
1968-69 - 1989-90	167	57	1,7
1990-91 - 1994-95	61	30	1,3

La simulation de crues par le modèle paramétré avec les valeurs médianes estimées sur les chroniques avant et après incendie met en évidence que des réponses très différentes peuvent être générées selon les caractères de la pluie. Le rapport entre les débits maximaux de crue consécutifs à une même pluie intense, après et avant incendie, avoisine 5 (Fig. 10). Il n'est que légèrement supérieur à 1 dans le cas d'une pluie longue et de faible intensité (Fig. 11).

L'interprétation physique des résultats de la modélisation n'est pas à l'abri d'une certaine subjectivité. Toutefois l'approche "en aveugle" qui a été retenue est parfaitement rigoureuse. Il n'en aurait pas été ainsi en utilisant des modèles qualifiés de physique (malgré

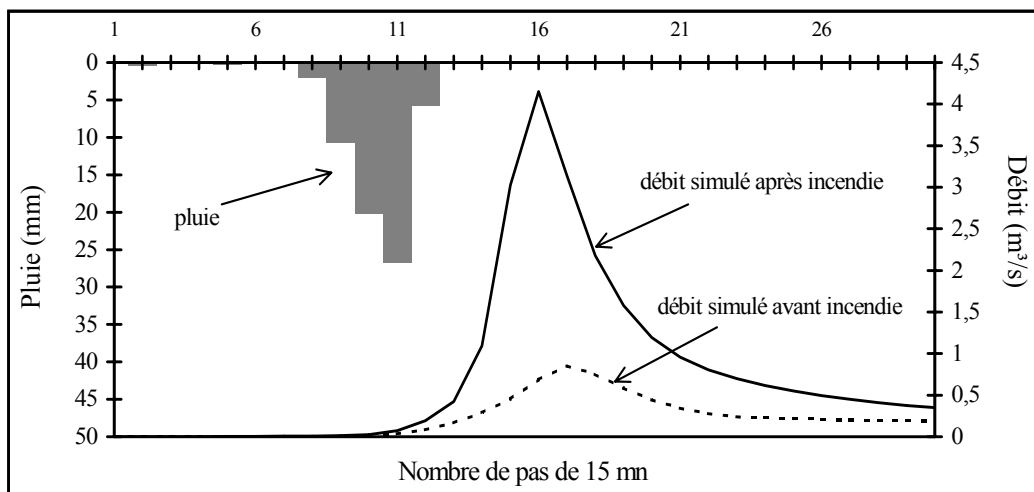


Figure 10 - Simulation d'une crue du ruisseau du Rimbaud générée par une pluie brève et intense.

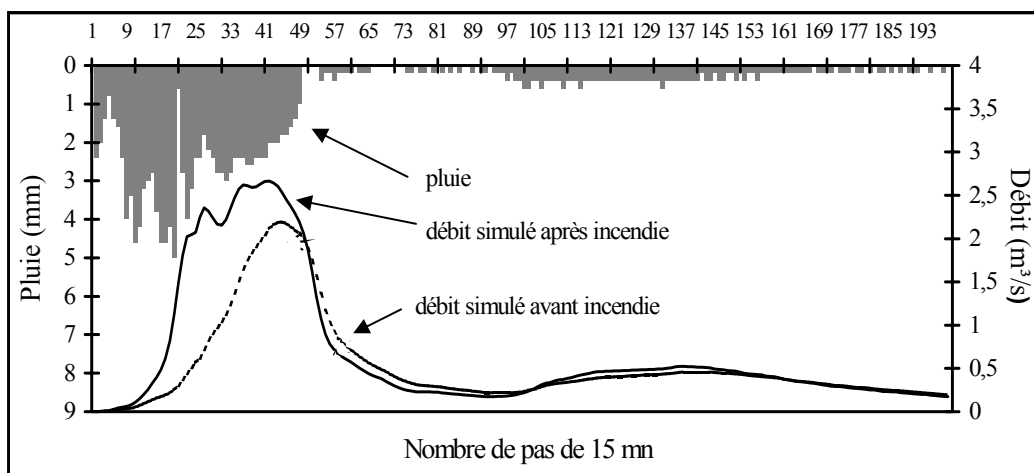


Figure 11 - Simulation d'une crue de ruisseau du Rimbaud générée par une pluie de faible intensité et de longue durée.

tout l'empirisme qu'ils comportent) dont la mise en œuvre aurait impliqué d'introduire au préalable les modifications engendrées par l'incendie, et donc de les imposer *a priori* ! L'étude descriptive des mécanismes mis en jeu, exposée dans le paragraphe précédent, fournit des éléments d'interprétation des résultats de la modélisation.

Lors des pluies intenses, les phénomènes de ruissellement superficiel sur les versants prennent une très grande importance. Une modification radicale de la fonction de transfert est alors constatée, avec une très nette augmentation des débits de pointe.

Lors des pluies d'intensité modeste, la forte conductivité hydraulique des sols à caractère sableux qui prédominent sur le bassin versant, induit un comportement sensiblement différent. L'alimentation des ruisseaux par le ruissellement superficiel sur les versants est alors circonscrite aux secteurs rocheux proches des thalwegs et les flux correspondant à ce mode d'alimentation restent faibles. Pour ces épisodes, par rapport à la situation antérieure à

l'incendie, le temps de réponse est réduit et le supplément de volume écoulé conséquent, mais les débits de pointe n'atteignent pas des valeurs significativement plus élevées.

5. Conclusion

Dans le bassin versant du Rimbaud, l'incendie de forêt d'août 1990 s'est traduit par une modification très nette du fonctionnement hydrologique lors des crues. Le comportement du ruisseau est devenu fortement impulsif. En effet, la destruction du couvert végétal a favorisé le déclenchement du ruissellement superficiel sur les versants et donc la multiplication de crues violentes. En décembre 1990 et septembre 1992, des débits de pointe de crue correspondant à la fréquence décennale avant incendie se sont produits à la suite de précipitations dont l'intensité et l'abondance ne présentaient pourtant aucun caractère exceptionnel. L'impact de l'incendie s'est ainsi manifesté pendant plus de deux ans. La revégétalisation du bassin versant a ensuite pondéré la réponse des écoulements aux précipitations, le taux de recouvrement par les arbustes des surfaces incendiées approchant 50 % en août 1993.

Le traitement à l'échelle annuelle des données du bassin versant du Rimbaud fait apparaître un accroissement des écoulements de l'ordre de 15 % après le feu. Toutefois la stationnarité de la chronique pluviométrique du poste du Rimbaud – lequel influence de façon déterminante le calcul des précipitations sur le bassin versant – est bien loin d'être démontrée. On peut en effet se demander si la destruction du couvert végétal n'a pas provoqué une diminution du pouvoir de captation de l'appareil en permettant une accélération du vent au sol. Pour sa part, la relation entre les écoulements annuels du bassin versant du Rimbaud et les précipitations annuelles du bassin du Valescure ne fait ressortir aucune augmentation des écoulements après l'incendie. Les recherches en cours devront s'attacher à lever les doutes concernant la représentativité des données pluviométriques sur lesquelles s'appuient les investigations. Dans l'immédiat, il ressort que sur le bassin versant du Rimbaud, qui est constitué de roches très massives et dispose d'une capacité de stockage en eau extrêmement réduite, les conséquences de l'incendie sur les écoulements annuels sont modestes et se situent dans la marge d'incertitude des méthodes utilisées.

Bibliographie

- LAVABRE J., 1988, Les programmes Spline isovtr et interg. Édit. *Cemagref*, Aix-en-Provence, 8 p. + annexes.
- LAVABRE J., ARNAUD P., FOLTON N. et MICHEL C., 1997, Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt. *Ingénieries - EAT*, n° 7, p. 21-30.
- MARTIN C., 1989, Dégradation d'un sol défriché à la station de Lambert (massif des Maures, Var, France). *Rev. Géomorph. dyn.*, t. XXXVIII, p. 17-29.
- MARTIN C., avec la collaboration de BÉGUIN É., LEVANT M. et QUILLARD J., 1996, L'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle et d'un petit bassin versant après incendie de forêt dans le massif des Maures. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 3, n° 3, p. 179-192.
- MARTIN C. et LAVABRE J., 1997, Estimation de la part du ruissellement sur les versants dans les crues du ruisseau du Rimbaud (massif des Maures, Var, France) après l'incendie de forêt d'août 1990. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 42, n° 6, p. 893-907.

- MARTIN C. et MARC V., 1993, Examen de la pluviométrie et des écoulements annuels après 25 années d'observation sur le BVRE du Réal Collobrier. Mélanges Frécaut, Presses Universitaires de Nancy, p. 243-252.
- MICHEL C., EDIJATNO et LEVIANDIER T., 1991, Progrès et application de la modélisation conceptuelle pluie-débit. *Rapport quadriennal pour la XX^{ème} Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale* (Vienne, 1991), publié avec le concours de l'Académie des Sciences de Paris, p. 219-222.
- PUECH C., LAVABRE J. et MARTIN C., 1991, Les feux de forêt de l'été 1990 dans le massif des Maures. *Sécheresse*, vol. 2, n° 3, p. 171-181.
- PUECH C., VINÉ P. et LEIBREICH J., 1994, Évolution comparée entre variations d'écoulement et couvert végétal suite à incendie. Réal Collobrier 1990-1993. *Actes du Workshop Final du Projet Européen DM2E* (Barcelone, 1994), Édit. Cemagref, 10 p.
- VINÉ P. (1997) - *Identification de l'hétérogénéité spatio-temporelle des comportements hydrologiques. Apports de la télédétection satellitale. Application aux bassins versants du Réal Collobrier (France) et de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso)*. Thèse de Doctorat de l'Université J. Fourier - Grenoble I, 285 p.
- VINÉ P. et PUECH C., 1994, Apport par télédétection de la régénération forestière après incendie et étude de l'influence de la végétation sur les écoulements. *Études de Géographie Physique*, n° XXIII (Actes de la Troisième Journée Scientifique du GIS Réal Collobrier), p. 33-44.